

强降雨条件下孔隙气压作用的高台阶排土场渗流与稳定性

崔 博¹⁾, 王光进^{1,2)}✉, 刘文连³⁾, 胡 斌⁴⁾, 艾啸韬¹⁾, 崔周全⁵⁾, 王孟来⁵⁾, 周宗红^{1,2)}

1) 昆明理工大学国土资源工程学院, 金属矿尾矿资源绿色综合利用国家地方联合工程研究中心, 昆明 650093 2) 云南省中-德蓝色矿山与特殊地下空间开发利用重点实验室, 昆明 650093 3) 中国有色金属工业昆明勘察设计院有限公司, 云南省岩土工程与地质灾害重点实验室, 昆明 650051 4) 武汉科技大学资源与环境工程学院, 武汉 430081 5) 云南磷化集团有限公司, 国家磷资源开发利用工程技术研究中心, 昆明 650113

✉通信作者, E-mail: wangguangjin2005@163.com

摘 要 强降雨作用下排土场非饱和带中的孔隙气压会阻碍散土体的雨水入渗, 从而进一步影响排土场的安全稳定。然而传统分析方法往往将孔隙气压视为大气压力而忽略其对排土场安全的影响。本文依托江西某矿山高台阶排土场工程, 基于现场实验和调查结果, 结合水平分层的排土场典型剖面, 分析了传统方法与考虑孔隙气压的高台阶排土场渗流规律及其安全稳定性, 探讨了强降雨条件下孔隙气压对高台阶排土场湿润锋、孔隙水压力和边坡安全系数的影响。研究结果表明: 降雨入渗初期的孔隙气压不显著, 其对高台阶排土场稳定性不产生直接影响; 但随着降雨的持续, 孔隙气压作用开始显现, 使得高台阶排土场的入渗速率降低, 湿润锋下移速度变慢, 孔隙水压上升变缓, 强降雨对高台阶排土场稳定性的影响也出现一定延时; 在降雨入渗中期, 孔隙气压将保持恒定, 延时效应会随入渗深度的增加而增强; 在降雨入渗后期, 当湿润锋下移至分层临界面时, 孔隙气压平衡被破坏, 将继续增大直至新的恒定值, 对高台阶排土场的影响加剧; 在湿润锋下移至相同深度时, 孔隙气压作用下的高台阶排土场安全系数明显降低。研究成果将为强降雨条件下的高台阶排土场的长期安全运行和灾害监测预警提供理论依据。

关键词 高台阶排土场; 强降雨入渗; 湿润锋; 孔隙气(水)压; 边坡稳定性

分类号 TD804

Seepage and stability analysis of pore air pressure on a high-bench dump under heavy rainfall

CUI Bo¹⁾, WANG Guang-jin^{1,2)}✉, LIU Wen-lian³⁾, HU Bin⁴⁾, AI Xiao-tao¹⁾, CUI Zhou-quan⁵⁾, WANG Meng-lai⁵⁾, ZHOU Zong-hong^{1,2)}

1) National and Local Joint Engineering Research Center for Green Comprehensive Utilization of Metal Ore Tailings Resources, Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

2) Yunnan Key Laboratory of Sino-German Blue Mining and Utilization of Special Underground Space, Kunming 650093, China

3) Yunnan Key Laboratory of Geotechnical Engineering and Geohazards, Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metal Industry Co., Ltd, Kunming 650051, China

4) School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China

5) National Engineering and Technology Center for Development & Utilization of Phosphate Resources, Yunnan Phosphate Group Co., LTD, Kunming 650113, China

收稿日期: 2020-09-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804600); 国家自然科学基金(联合基金)重点资助项目(U1802243); 国家自然科学基金面上资助项目(41672317); 岩土力学与工程国家重点实验室开放基金资助课题(Z018017)

✉ Corresponding author, E-mail: wangguangjin2005@163.com

ABSTRACT Under heavy rainfall, the pore air pressure in the unsaturated zone of a dump hinders rainwater infiltration in loose soil, which further affects the safety and stability of the dump. However, traditional analysis methods often regard pore air pressure as atmospheric pressure and ignore its impact on dump safety. Relying on the high bench dump project of a copper mine in Jiangxi, basing on the field test and survey results and combining with the horizontal slice of a typical dump profile, the seepage law and safety stability of a high bench dump with traditional methods while considering the pore air pressure were analyzed. Moreover, the influence of pore air pressure on a wet front, pore water pressure, and slope safety factors of high bench dump under heavy rainfall conditions were discussed. The research results show that pore air pressure at the initial stage of rainfall infiltration is not significant, and pore air pressure does not have a direct impact on the stability of the high bench dump. However, as the rainfall continues, the effect of the pore air pressure begins to appear, reducing the infiltration rate of the high bench dump. Further, the downward movement speed of the wetting front becomes slower, the pore water pressure rises slowly, and the influence of the heavy rainfall delays the stability of the high bench dump. In the middle of rainfall infiltration, the pore air pressure remains constant, the delay effect varies, and the penetration depth increases. In the late stage of rainfall infiltration, when the wetting front moves down to the critical plane of the layering, the pore air pressure balance is destroyed, continuing to increase to a new constant value, which increases the impact on the high bench dump. When the traditional method of wetting front and considering the pore air pressure of wetting front move down to the same depth, the safety factor of the high bench dump under the action of pore air pressure is obviously reduced. The research results provide a theoretical basis for long-term safe operation and disaster monitoring and early warning of high bench dump under heavy rainfall conditions.

KEY WORDS high bench dump; heavy rainfall; wetting front; pore air (water) pressure; slope stability

强降雨会使得排土场土体含水率增大、基质吸力降低,同时强降雨入渗还会使土体非饱和带内孔隙中的气体被压缩,造成气压不断增大,不但会降低雨水的入渗速率,而且增加了排土场边坡的冲刷度,致使排土场发生滑坡、失稳等地质灾害。

目前,国内外学者针对强降雨对边坡稳定性影响的研究已经取得了一定的成果^[1-10],但大部分稳定分析模型在分析降雨入渗对边坡稳定性的影响时并未考虑过孔隙气压的存在。Morel-Seytoux^[10]最先提出一种理论:雨水入渗导致封闭的气体压力会持续增加,之后气体会一直做压缩与排出的重复过程;Grismer 等^[11]、Weir 等^[12]、Latifi 等^[13]和 Hammecker 等^[14]在许多试验中验证了该理论的正确性,并得出降雨入渗压缩了湿润锋下部的气体,且双层土的孔隙气压会比均质土更加显著^[13];为了分析在渗流过程中土体孔隙内的气压力变化规律,孙冬梅等^[15-17]基于水-气二相流理论将非饱和带中的孔隙气和水建立了数学模型,可以更准确的模拟水、气的流动规律,为研究孔隙气压力对雨水入渗的影响提供了依据,并通过该模型研究了均质土层的降雨入渗过程,得到了孔隙水压、孔隙气压、毛细压力和含水量的变化过程,根据地表孔隙气压与入渗率的相关性验证了孔隙气压的增大会阻碍雨水的入渗,且基质吸力会使相同滑动面上的稳定性系数增加;李援农和其他学者^[18-20]采

用室内试验得出土体气压力是表面积水深度与湿润锋共同作用的结果,并拟合出了入渗稳定后气压的形式与变化过程;Wang 等^[21]通过试验提出了土体内气压的变化形式,其认为在水流入渗时,土体内气压上升到上临界值时,气体会突破上层土体,当压力下降到下临界值时气体会再次被封闭;在 Wang 等的基础上韩同春等^[22]简化了考虑气压的入渗模型,得出孔隙气压力在大面积强降雨下对滑坡具有显著的延时性;Ram 等^[23]等建立了某边坡的三维渗流数值模型,并考虑了其在降雨条件下孔隙气压的运动规律,其结果表明孔隙气压延缓了滑坡的时间;王继成等^[24]和 Zhang 等^[25]研究了气压对边坡稳定的影响,王继成等针对大面积浅层风化土边坡,通过摩尔库伦准则与极限平衡法建立了考虑气压力影响下的稳定分析模型,得出了孔隙气压显著降低了土体边坡的安全系数;Zhang 等通过研究孔隙气压对土边坡稳定性的影响,得出在稳定渗流情况下土体中的孔隙气压对边坡稳定性的影响可以被忽视,而在降雨情况下,非饱和区产生的孔隙气压将降低土边坡的安全系数,且滑动面与地下水位间的距离越大,孔隙气压对边坡稳定性的影响越大;何健^[26]通过数值模拟验证了气压力的存在对边坡稳定有一定的影响,但模型并未与实际工程相结合。然而导致高台阶排土场在强降雨作用下破坏失稳的影响因素复

杂多变,各因素之间的相互作用使得高台阶排土场失稳破坏的预测具有强烈的不确定性,失稳机理和破坏过程至今没有完全的定论,导致现有的高台阶排土场在强降雨条件下的稳定性评价方法及灾害防控不完善,严重制约着矿山重大灾害整体防御水平。本文在之前的研究基础上,以江西某矿山高台阶排土场为研究对象,将气压力引入到高台阶排土场中分别模拟了强降雨条件下考虑孔隙气压力和不考虑孔隙气压力时的高台阶排土场渗流与稳定性,从而为强降雨条件下高台阶排土场的长期安全运行和灾害监测预警提供一定的理论基础。

1 考虑孔隙气压边坡稳定性分析模型

降雨入渗是雨水对土体中气体的驱散过程^[24],强降雨入渗导致高台阶排土场湿润锋处的基质吸力迅速降低,其下部气压不断压缩,对雨水入渗产生阻碍作用,同时会对边坡的稳定性造成影响。

1.1 不考虑孔隙气压的稳定性分析模型

图1为降雨条件下不考虑孔隙气压的排土场边坡的受力分析图, W 为单位宽度土条重量, α 为排土场自然边坡角, z_f 为湿润锋处的深度。湿润锋处的安全系数 F_s 为湿润区的总抗滑力 τ_f 与下滑力 τ_m 的比值,湿润锋处抗滑力 τ_f 采用非饱和土抗剪强度公式求解,下滑力 τ_m 为湿润区土体的重度沿坡面的分量。根据非饱和土摩尔-库伦屈服准则^[14]与极限平衡法得到边坡稳定安全系数 F_s 的计算公式:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_m} = \frac{c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b}{\tau_m} \quad (1)$$

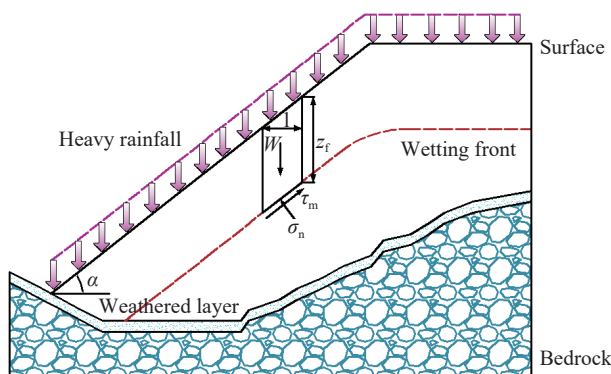


图1 降雨条件下排土场边坡受力分析图(不考虑孔隙气压)

Fig.1 Force analysis of the dump under rainfall conditions (without considering the pore air pressure)

式中: c' 、 φ' 为土的有效黏聚力与内摩擦角; φ^b 为抗剪强度随基质吸力变化的吸力摩擦角; σ_n 为失效

斜面上的正应力; u_a 为大气压力; $u_a - u_w$ 为土体湿润锋处的基质吸力。

因为排土场湿润区土体处于饱和,湿润锋处非饱和土体抗剪强度用有效正应力计算:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= (\gamma_t - \gamma_w) z_f \cos^2 \alpha \\ \tau_m &= \gamma_t z_f \cos \alpha \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: γ_t 为湿润区饱和土体重度; γ_w 为水的重度; α 为边坡倾角。

在强降雨条件下,假定湿润区土体饱和,湿润锋上方土体的基质吸力为0,得到不考虑孔隙气压的稳定分析模型:

$$F_s = \frac{c' + (\gamma_t - \gamma_w) z_f \cos^2 \alpha \tan \varphi'}{\gamma_t z_f \cos \alpha \sin \alpha} \quad (3)$$

1.2 考虑孔隙气压的稳定性分析模型

当考虑孔隙气压影响时,排土场边坡分析图见图2。降雨条件下湿润区的土体接近饱和,湿润锋以上的土体基质吸力可近似为0处理。故考虑孔隙压力的边坡稳定安全系数 F_{sa} 的计算公式可由式(1)改写为:

$$F_{sa} = \frac{\tau_f}{\tau_m} = \frac{c' + (\sigma_n - H_a) \tan \varphi'}{\tau_m} \quad (4)$$

式中: H_a 为气体压力值。

降雨入渗过程可以分为气体被压缩、排出两个阶段。降雨使得排土场表面被封闭,雨水的下渗导致气体被压缩,造成孔隙气压迅速增大。当气压达到气体突破压力值时,孔隙气压会以气泡的形式排出坡表(多孔介质中空气的传导性优于水的传导性);当气压减小到气体闭合压力值时,排土场边坡的排气通道会重新被雨水封闭,如此气体不断地排出与压缩,气压力会基本稳定在 $H + H_c$ ^[11]。对不同的土质进行试验^[13,21]可知,预测的气压力值与恒定后测量的气压力值基本吻合,得到以下关系式:

$$H_a = H + H_c \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得到考虑孔隙气压的稳定分析模型:

$$F_{sa} = \frac{c' + (\gamma_t z_f - \gamma_w H_a) \cos^2 \alpha \tan \varphi'}{\gamma_t z_f \cos \alpha \sin \alpha} \quad (6)$$

$$F_{sa} = \frac{c' + (\gamma_t z_f - \gamma_w H_c) \cos^2 \alpha \tan \varphi'}{\gamma_t z_f \cos \alpha \sin \alpha} \quad (7)$$

2 工程概况及模型建立

2.1 工程概况

江西某高台阶排土场位于露天采场东北方向

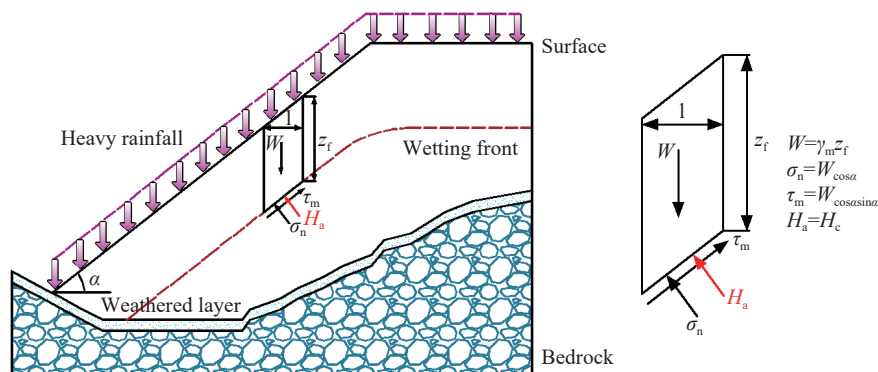


图2 降雨条件下排土场边坡受力分析图(考虑孔隙气压)

Fig.2 Force analysis of the dump under rainfall conditions (considering the pore air pressure)

约 1200 m 处, 南北向长度约为 1200 m, 东西向宽度约为 600 m。矿区属丘陵中低山地貌, 受风化和雨水侵蚀作用, 山坡坡角多为 $10^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。高台阶排土场年平均降雨量为 2185.4 mm, 昼夜最大降雨量达 311.7 mm, 全年降雨平均天数为 171 d, 是江西省的多雨地区之一。排土场底部岩石主要由变质岩、火山岩等非可溶性岩石构成, 近地表岩石风化较强, 风化带深 10 ~ 30 m, 透水性差, 赋水性弱, 不存在溶洞、流砂和暗流等复杂的水文地质条件。地下水主要通过大气降水来补给, 且水源供给有限, 底部无大的断层破碎带。因此, 可以认为高台阶排土场的水文地质条件简单, 故本文暂不考虑地下水对高台阶排土场稳定性的影响。

2.2 高台阶排土场散体粒径分布调查

目前高台阶排土场已形成四个台阶,分别是200、223、239和250 m台阶。根据现场勘查得知,200 m台阶以上由于排土场各台阶高度小于40 m,基本未开始分级;200 m台阶排土高度为110 m,采用“一坡到底”的排土方式进行排土。为了研究该

排土方式是否造成堆积散体的粒径分级现象, 分别采用直接测量法和筛分法^[27-28]对 200 m 台阶排土场粒径分布进行研究, 结合两种方法可以使所获得的粒径分布更接近于实际, 起到相互补充和验证的作用。

高台阶排土场颗粒大于等于 100 mm 的土料可采用坡面取样的方式进行直接测量粒径调查(见图 3(a)), 由此可以确定大块石的粒径随排土场堆积高度的变化规律: 小颗粒的散体废石主要集中于台阶中上部, 大块石主要堆积于台阶中下部; 对于排土场颗粒大于 0.1 mm 小于 100 mm 的土料采用筛分法来测定粒径, 对 200 m 台阶排土场取七个测点进行筛分试验, 由筛分结果可对排土场各个测点的中间粒径 D_{50} 、平均粒径 $\bar{D}$ 与排土场相对高度 (h/H) 的关系进行统计, 其大小可以反映高台阶排土场颗粒粒度组成(见图 3(b)). 从图 3(b) 易知, 高台阶排土场坡面散体的粒径分布随其相对高程的增加, 平均粒径 $\bar{D}$ 与中间粒径 D_{50} 皆呈指数趋势减小。

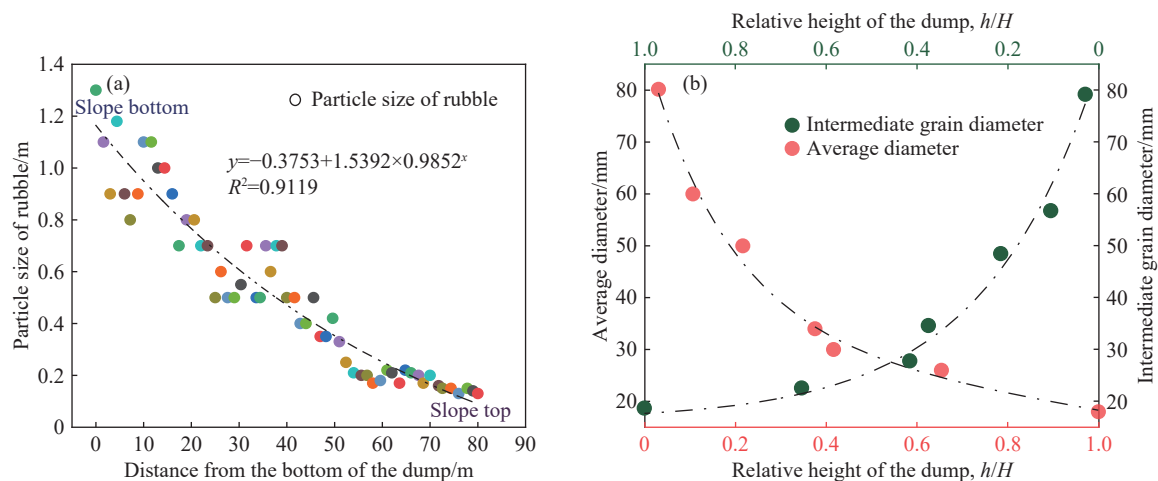


图 3 粒径随排土场堆积高度变化规律。(a)颗粒尺寸 ≥ 100 mm; (b) 0.1 mm $<$ 颗粒尺寸 <100 mm

Fig.3 Diameter changes with the dump height: (a) particles size ≥ 100 mm; (b) 0.1 mm $<$ particles size < 100 mm

由此可以说明, 粒径分级使 200 m 台阶高台阶排土场形成明显的“水平分层”: 小颗粒主要分布在排土场的上部, 中等颗粒分布在排土场中部, 大块岩石主要停留在排土场的底部.

2.3 高台阶排土场现场渗透试验

高台阶排土场属于非均质多孔介质, 其渗透系数是由多种土体复合而成且很难在室内进行测定, 故需在高台阶排土场的不同高度进行多组现场渗透试验.

结合现场试验条件, 由于超长距离供水且供水量较小, 选用变水头渗透试验更为合理. 试验的具体步骤为: 分别在 223、239 和 200 m 台阶的上部、中部和下部选择代表性场地开挖试坑, 试坑尺寸均为 50 cm×50 cm×50 cm. 随后进行试水试验使土体达到饱和, 最后进行多次注水试验求取稳定试验时的平均值. 渗透系数的计算公式为:

$$K = \frac{0.0523r^2}{A} \cdot \frac{\ln \frac{H_1}{H_2}}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

式中: K 为渗透系数, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; t_1 、 t_2 为注水试验某一时刻的试验时间, min; H_1 、 H_2 为在试验时间为 t_1 、 t_2 时的试验水头, cm; r 为套管内半径, cm; A 为形状系数, cm, 其计算公式为:

$$A = \frac{2\pi l}{\ln \frac{2\sqrt{K_h/K_v}l}{r}} \quad (9)$$

式中: K_h 为水平渗透系数; K_v 为垂直渗透系数; l 为试验段进入水的深度. 计算所得的渗透系数见表 1.

表 1 高台阶排土场渗透系数计算结果

Table 1 Permeability coefficient of the high dump

Testing position	Permeability coefficient/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
Step 239 m	3.51×10^{-3}
Step 223 m	3.49×10^{-3}
Top of the step 200 m	2.50×10^{-3}
Middle of the step 200 m	4.70×10^{-3}
Bottom of the step 200 m	5.00×10^{-3}

依据试验结果可以看出, 在 200 m 台阶以上由于土体颗粒分级不明显, 所得的渗透系数相差几乎很小; 在 200 m 台阶排土场由于散体颗粒的粒径分级特征明显, 台阶上部主要为细小颗粒, 台阶中部多为中等块度颗粒, 台阶下部主要为粗大颗粒, 其对应的土体渗透系数也由小变大发展. 故 200 m 台阶以上渗透系数可按 223 m 台阶、239 m 台阶渗

透系数的平均值来取值, 200 m 台阶由于渗透系数相差较大, 且粒径分级明显导致土体的力学参数也不相同, 如果按均质土体来进行模拟误差太大, 所以需对 200 m 台阶进行分层处理.

2.4 模型建立

根据矿山原始地形图与现场勘查结果, 在高台阶排土场临空坡面选取了两条代表性剖面进行数值模拟分析, 图 4 为高台阶排土场三维模型及剖面线具体位置.

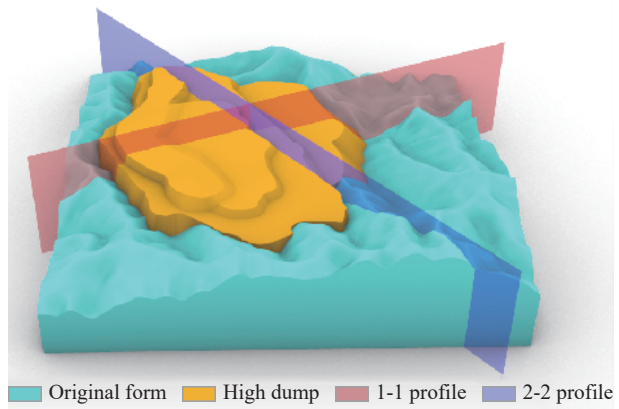


图 4 高台阶排土场三维模型及剖面线位置
Fig.4 3D model and section line of the high dump

为了更好的模拟排土场的水平分层, 结合排土场现场粒径调查结果, 将排土场堆积散体材料自上而下分为 4 层, 分别为爆堆散体(未分级废石)、中密堆积料上部、稍密堆积料中部、松散堆积料下部见图 5 和 6. 本文通过高台阶排土场现场采用的图像法与直接测量法综合比较选取 37° 作为模型中的边坡角. 排土场底部岩石较坚硬且透水性差, 且排土场属于高台阶排土场, 短时强降雨到达不了初始地下水位线处, 对渗流模拟影响很小, 故初始地下水可简化为按水平处理^[1], 取实测地下水位标高 76.64 m. 本文选取最大台阶高度为 110 m 的排土场边坡作为此次研究对象.

本次数值分析采用的土性参数指标见表 2. 表中计算参数是基于室内大型直剪试验、室内大型三轴试验和现场渗透试验等得到的试验结果, 并综合考虑相关排土场粗粒料的抗剪强度参数和渗透系数经验值^[29-37] 综合考虑确定的.

通过 Fredlund 和 Xing 和粒径数据估计方法, 将饱和渗透系数和体积含水量函数进行拟合, 获取了高台阶排土场的渗透系数曲线和土水特征曲线关系图, 见图 7 和 8. 由图可知, 堆积料下部的体积水含量与渗透系数最大, 爆堆散体、堆积料中部相对较小, 堆积料上部最小.

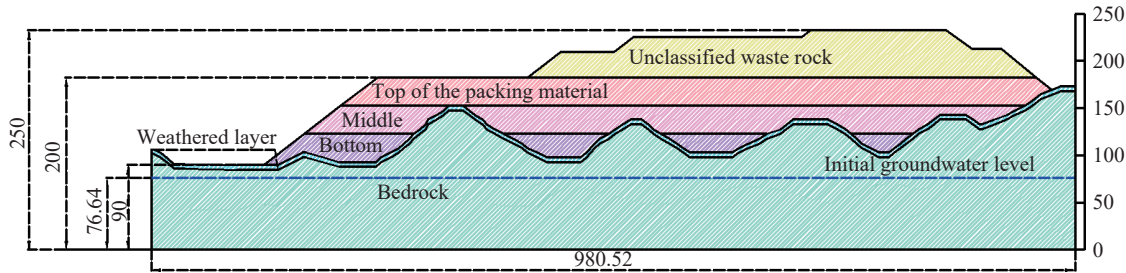


图 5 1-1 计算剖面图 (单位: m)
Fig.5 Sectional drawing of the 1-1 profile (Unit: m)

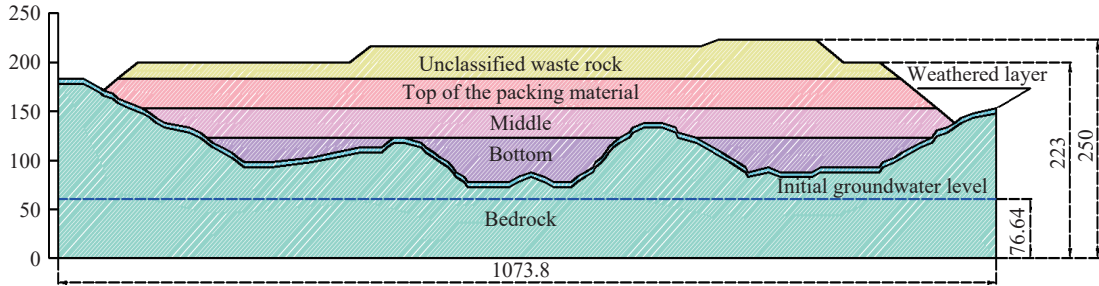


图 6 2-2 计算剖面图 (单位: m)
Fig.6 Sectional drawing of a 2-2 profile (Unit: m)

表 2 高台阶排土场岩土力学参数

Table 2 Mechanical parameters of the high dump

Rock-soil layer	Natural unit weight, $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	Saturated unit weight, $\gamma_s/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	Water-bearing condition	Cohesion, C/kPa	Internal friction angle, $\Phi/(^{\circ})$	Permeability coefficient, $k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
Unclassified waste rock	19.20	20.50	Saturated	42.4	30.3	3.50×10^{-3}
			Natural	63.0	35.6	
Top of the packing material	18.60	19.70	Saturated	31.7	27.8	2.50×10^{-3}
			Natural	55.0	33.0	
Middle of the packing material	19.40	20.70	Saturated	39.0	27.0	4.70×10^{-3}
			Natural	65.0	36.0	
Bottom of the packing material	19.80	21.00	Saturated	44.7	32.3	5.00×10^{-3}
			Natural	68.0	37.2	
Weathered layer	20.00	21.50	Saturated	55.0	31.7	5.20×10^{-7}
Bedrock	23.50	24.50	Natural	350.0	40.0	1.20×10^{-8}

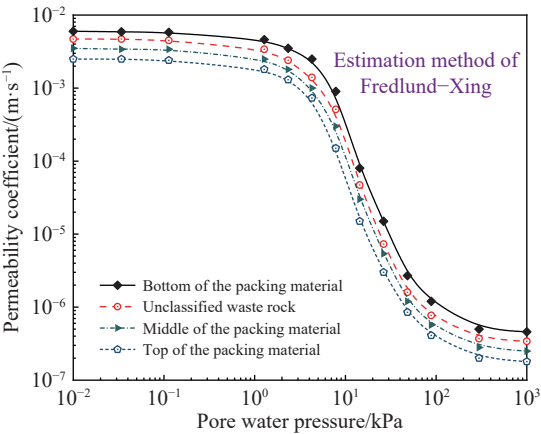


图 7 渗透系数曲线
Fig.7 Permeability coefficient curves

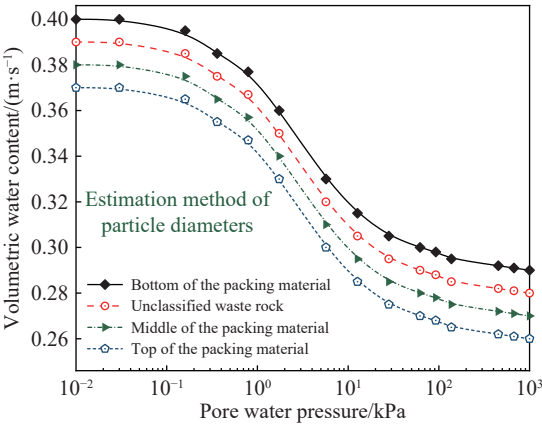


图 8 土水特征曲线
Fig.8 Soil-water characteristic curves

3 模型边界及初始条件

(1)模型边界条件: 底部设为不透水、不透气边界, 土层表面设置进气值 1.8 kPa^[24], 模型两侧在初始地下水位以上设为零流量边界条件, 以下设为定水头边界条件, 水头值等于初始地下水位 76.64 m。

(2)模拟的降雨: 根据该地区多年降雨实测资料, 选取最大昼夜降雨量 311.7 mm·d⁻¹ 作为降雨强度, 降雨工况设计见表 3, 降雨时间取 6, 12, 18, 24 和 30 h。

表 3 降雨工况设计

Table 3 Design of the rainfall condition			
Rainfall condition	Rainfall intensity/(mm·d ⁻¹)	Duration/h	Total precipitation/mm
Rainstorm	311.7	6	77.925
		12	155.850
		18	233.775
		24	311.700
		30	389.625

(3)初始条件: 土层负孔隙水压力由郑开欢等^[1]推导的土体天然含水率、天然重度与天然体积含水量的换算公式, 结合土-水特征曲线确定排土场边坡初始基质吸力为 208 kPa, 孔隙气压力为大气压力等于 0 kPa。

4 计算结果分析

4.1 边坡渗流分析

通过对高台阶排土场 1-1 剖面进行历时 30 h 强降雨数值模拟, 获得了 1-1 剖面入渗过程中湿润锋深度随降雨时长的变化规律和强降雨工况孔隙水压的分布结果。由图 9 和 10 可以看出相同时间考虑孔隙气压力的高台阶排土场湿润锋下移速度变慢、对应的孔隙水压力上升也相对变缓。

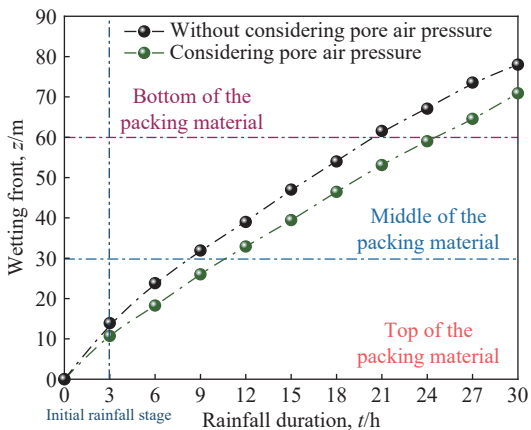


图 9 湿润锋时程曲线

Fig.9 Wetting front time curves

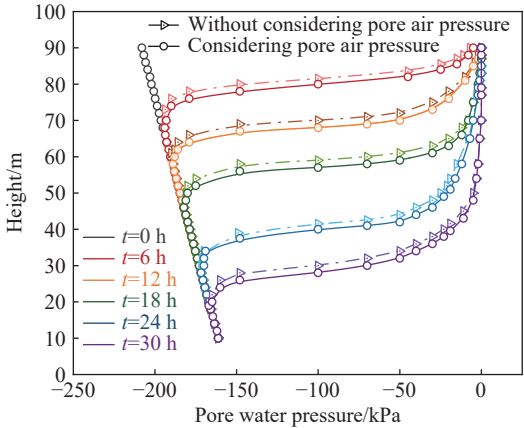


图 10 强降雨条件下不同时段孔隙水压力分布情况

Fig.10 Distribution of pore water pressure in different periods

由图 9 可知, 在不考虑孔隙气压时, 在降雨入渗前期 ($0 \text{ h} \leq t < 3 \text{ h}$) 由于高台阶排土场土体干燥导致其基质吸力梯度大, 湿润锋下移较快, 随着降雨持续其成线性增加; 在降雨入渗中期 ($3 \text{ h} \leq t < 9 \text{ h}$), 主要受土体自身入渗能力的影响, 高台阶排土场入渗速率逐渐减小呈稳定趋势, 随着降雨时间的增长, 湿润锋呈一定的非线性; 在降雨入渗后期 ($9 \text{ h} \leq t \leq 30 \text{ h}$) 当湿润锋到达堆积料中部时 ($t=9 \text{ h}$), 土体力学参数变大使入渗速率加快, 湿润锋下移变快; 当湿润锋到达堆积料下部时 ($t=21 \text{ h}$), 土体力学参数继续增大导致入渗速率更快, 较之前相比湿润锋深度下移更快。

当考虑孔隙气压时, 在降雨入渗初期 ($0 \text{ h} \leq t < 3 \text{ h}$), 由于高台阶排土场边坡表层饱和度较小且渗透系数较大, 气体可沿孔隙从排土场表层溢出, 此时孔隙气压力近似等于大气压力, 对排土场边坡影响很小, 几乎可以忽略; 但随着降雨入渗湿润锋不断下移 ($3 \text{ h} \leq t < 11 \text{ h}$), 孔隙的气体被不断压缩无法沿土层表面溢出, 使得孔隙气压力迅速增大, 雨水入渗速率降低, 湿润锋下移速度变缓; 随后孔隙气压力不断地排出与压缩会大致恒定在 $H+H_c$, 湿润锋呈线性增加; 当湿润锋到达堆积料中部时 ($t=11 \text{ h}$), 由于高台阶排土场力学参数的改变, 破坏了孔隙气压原有的平衡状态, 孔隙气压在原有基础上将会迅速增大直至达到新的恒定值 H_1+H_{c1} , 湿润锋较之前相比下降变缓; 当湿润锋到达堆积料下部时 ($t=24 \text{ h}$), 孔隙气压将会在原基础上继续增大直至达到新的恒定值 H_2+H_{c2} , 湿润锋下降速度更慢。与不考虑孔隙气压相比较, 考虑孔隙气压力时高台阶排土场湿润锋下移变慢, 有着明显的延时作用, 对雨水入渗有很大的阻碍。

另一方面, 由图 10 可知, 在强降雨工况下, 随着雨水入渗湿润锋不断下移, 高台阶排土场土体

逐渐接近饱和状态, 孔隙水压持续增长, 导致基质吸力逐渐减小, 抗剪强度逐渐减弱, 下滑力不断增大, 使高台阶排土场逐渐失稳; 考虑孔隙气压力对高台阶排土场入渗的影响时, 由于孔隙气压对湿润锋的延时作用, 使得孔隙水压上升变缓, 当湿润锋下移至高台阶排土场分层临界面时, 由于孔隙气压的变化导致湿润锋下移变慢, 孔隙水压较之前相比上升也变缓, 但整体趋势没有改变.

4.2 边坡稳定性分析

通过高台阶排土场两个典型剖面的稳定性数值分析, 获得了强降雨条件下考虑孔隙气压与不考虑孔隙气压作用的高台阶排土场的边坡稳定性系数如表 4 所示.

表 4 高台阶排土场安全系数计算结果

Table 4 Safety factor of the high dump

Profile	Duration of rainfall/h	Safety factor		Influence degree of pore air pressure/%
		Without considering pore air pressure	Considering pore air pressure	
1-1 profile	0	1.815	1.815	0
	3	1.638	1.656	1.06
	6	1.545	1.600	3.44
	12	1.426	1.486	4.01
	18	1.364	1.425	4.26
	24	1.343	1.377	2.45
	30	1.339	1.355	1.20
2-2 profile	0	1.789	1.789	0
	3	1.581	1.597	1.00
	6	1.464	1.525	3.98
	12	1.309	1.384	5.42
	18	1.253	1.302	4.76
	24	1.210	1.245	2.81
	30	1.194	1.218	1.98

同时, 此处还对高台阶排土场降雨各个时段考虑孔隙气压力与不考虑气压力的稳定性系数进行了对比分析, 探讨了降雨时长、湿润锋与高台阶排土场安全系数的变化规律. 由图 11 和 12 可知, 在不考虑孔隙气压力的情况下, 强降雨入渗导致高台阶排土场含水量增大, 基质吸力迅速降低, 出现暂态饱和区, 使得土体下滑力增加, 弱化了土体强度参数引起了非饱和土的抗剪强度减弱, 边坡安全系数下降. 且当湿润锋到达堆积料中部时 ($t=9$ h), 土体渗透系数变大导致入渗速率加快, 使得安全系数的降低变快; 当湿润锋到达堆积料下

部时 ($t=21$ h), 土体渗透系数继续增大入渗速率更快, 较之前相比高台阶排土场安全系数的降低加快.

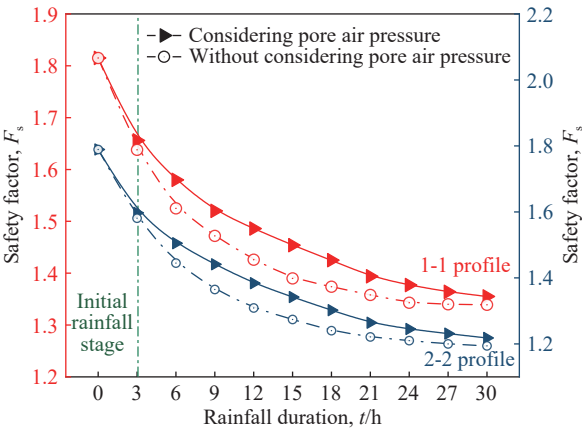


图 11 降雨时长与安全系数的关系

Fig.11 Relationship between rainfall duration and safety factor

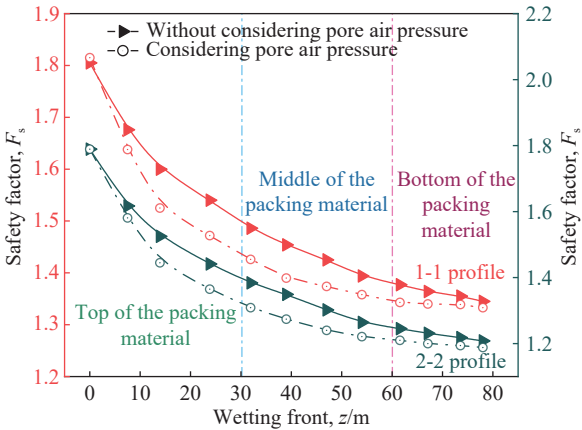


图 12 湿润锋与安全系数的关系

Fig.12 Relationship between wetting front and safety factor

在考虑孔隙气压力的情况下, 在降雨入渗初期 ($0 \text{ h} \leq t < 3 \text{ h}$), 由于高台阶排土场内的孔隙气压力近似等于大气压力, 对高台阶排土场的稳定性影响较小; 随着降雨入渗 ($3 \text{ h} \leq t < 11 \text{ h}$) 孔隙气压力迅速增大使得雨水入渗降低, 湿润锋下移深度变缓, 对安全系数的降低有延时效应; 孔隙气压力不断地排出与压缩会基本恒定在 $H+H_c$, 其对高台阶排土场稳定性的延时效应会随着雨水入渗而增加; 当湿润锋到达高台阶排土场分层临界面时 ($t=11 \text{ h}$, $t=24 \text{ h}$), 孔隙气压原有的平衡状态被破坏, 在原有基础上孔隙气压会继续增大直至达到新的平衡, 对高台阶排土场稳定性的影响与之前相比更加显著. 另一方面, 在湿润锋到达相同深度时, 考虑孔隙气压力的排土场稳定性安全系数小于不考虑孔隙气压力的安全系数, 说明孔隙气压力降低了高台阶排土场的安全系数, 需把孔隙气压力当成影响其稳定性的一项重要因素.

5 结论

(1)高台阶排土场现场调查与渗透试验结果表明:对于“一坡到底”的高台阶排土场具有明显的粒径分级现象,即细小颗粒主要分布在排土场上部,中部主要为中等块度颗粒,下部多为粗大颗粒。高台阶排土场的明显粒径分级现象会对强降雨条件下堆积体内的孔隙气压产生影响,从而影响高台阶排土场边坡的安全稳定性。

(2)强降雨作用下的排土场孔隙气压分析结果表明:强降雨初期,降雨入渗对孔隙气压的影响较小,其对高台阶排土场稳定性不产生直接影响;但随着降雨的持续,孔隙气压作用开始显现,使得高台阶排土场的入渗速率降低,湿润锋下移速度变慢,孔隙水压上升变缓,强降雨对高台阶排土场稳定性的影响也出现一定延时;在降雨入渗中期,孔隙气压将保持恒定,延时效应会随入渗深度的增加而增强;在降雨入渗后期,当雨水入渗下移至分层临界面时,孔隙气压的变化会对高台阶排土场的影响会加剧;在湿润锋下移至相同深度时,孔隙气压作用下的高台阶排土场安全系数明显降低。由此可知,强降雨入渗作用下的孔隙气压会对高台阶排土场的稳定性产生直接影响。

(3)分层(土层性质突变)会对孔隙气压产生直接影响。即当降雨入渗到堆积料中分层位置时,土体力学参数的增大破坏了原孔隙气压平衡,导致其不再保持恒定,孔隙气压在原基础上不断地排出与压缩且迅速增大,当达到 H_1+H_{c1} 后孔隙气压不再改变,湿润锋下移变慢,孔隙水压上升变缓,对高台阶排土场稳定性的影响也更加显著;当降雨入渗到达堆积料下分层位置时,土体力学参数继续增大,孔隙气压从 H_1+H_{c1} 迅速增大至新的恒定值 H_2+H_{c2} 后保持不变,对湿润锋、孔隙水压和排土场稳定性的影响更显著。引入孔隙气压并考虑水平分层(土层性质突变)所产生的影响能更准确获取高台阶排土场湿润锋、孔隙水压和边坡安全系数等相关参数,可以显著提高计算的排土场边坡安全系数的可靠性。

强降雨条件下的孔隙气压会对高台阶排土场边坡产生直接影响,其也是分析强降雨条件下高台阶排土场稳定性的重要考量因素,即考虑孔隙气压作用下的排土场安全稳定性更接近于实际工程的情况。因此,考虑强降雨条件下孔隙气压对高台阶排土场边坡稳定性的作用具有重要意义。尽管如此,由于时间和条件的限制,本文仅针对江西

某特定的高台阶排土场开展了有限研究,但在不同土性、不同堆排工艺、不同地形条件下的排土场产生的孔隙气压、入渗规律和边坡稳定也不相同,且在降雨后孔隙气压的变化规律尚不明确,故还需开展进一步的系统深入研究。

参 考 文 献

- [1] Zheng K H, Luo Z Q, Luo C Y, et al. Layered gravel soil slope stability of a waste dump considering long-term hard rain. *Chin J Eng*, 2016, 38(9): 1204
(郑开欢, 罗周全, 罗成彦, 等. 持续暴雨作用下排土层状碎石土边坡稳定性. *工程科学学报*, 2016, 38(9): 1204)
- [2] Su Y H, Li C C. Slope stability analysis based on Green-Ampt infiltration model under intermittent heavy rainfall. *J Hunan Univ (Nat Sci)*, 2020, 47(3): 28
(苏永华, 李诚诚. 间歇性强降雨下基于Green-Ampt入渗模型的边坡稳定性分析. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(3): 28)
- [3] Wang G J, Tian S, Hu B, et al. An experimental study on tailings deposition characteristics and variation of tailings dam saturation line. *Geomech Eng*, 2020, 23(1): 85
- [4] Wang S H, He J, Yang T J. Numerical Analysis on stability of slope considering rainfall infiltration. *J Northeast Univ (Nat Sci)*, 2018, 39(8): 1196
(王述红, 何坚, 杨天娇. 考虑降雨入渗的边坡稳定性数值分析. *东北大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(8): 1196)
- [5] Hu Q G, Yuan N, Liu D S, et al. Analysis of rainfall infiltration process and stability of soil slope with multilayer structure. *China J Highw Transp*, 2018, 31(2): 67
(胡庆国, 袁宁, 刘登生, 等. 多层结构土质边坡降雨入渗过程及稳定性影响分析. *中国公路学报*, 2018, 31(2): 67)
- [6] Kong Y F, Song E X, Yang J, et al. Rainfall's effect on the stability of unsaturated slopes. *J Civil Architect Environ Eng*, 2013, 35(6): 16
(孔郁斐, 宋二祥, 杨军, 等. 降雨入渗对非饱和土边坡稳定性的影响. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(6): 16)
- [7] Wang L. *Research on the Key Technique of Stability and Safety Control of the Large Dump in Open-Pit Mine*[Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015
(王莉. 露天矿大型排土场稳定性及安全控制关键技术研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2015)
- [8] Huang G H. Stability analysis of waste dump with complex terrain under heavy rainfall infiltration. *Chin J Geotech Eng*, 2013, 35(Suppl 2): 292
(黄刚海. 强降雨入渗下复杂地形排土场稳定性分析. *岩土工程学报*, 2013, 35(增刊2): 292)
- [9] Wang G J, Gao Y W, Tang Y J. Research on the mechanism for chemical clogging and its effect on the stability of tailing dam.

- Bulgarian Chemical Communications*, 2017, 49(1): 228
- [10] Morel-Seytoux H J. Infiltration affected by air, seal, crust, ice and various sources of heterogeneity//*Proceedings of ASAE National Conference on Advances in Infiltration*. Chicago, 1983: 132
- [11] Grismer M E, Orang M N, Clausnitzer V, et al. Effects of air compression and counterflow on infiltration into soils. *J Irrigat Drainage Eng*, 1994, 120(4): 775
- [12] Weir G J, Kissling W M. The influence of airflow on the vertical infiltration of water into soil. *Water Resour Res*, 1992, 28(10): 2765
- [13] Latifi H, Prasad S N, Helweg O J. Air entrapment and water infiltration in two-layered soil column. *J Irrigat Drainage Eng*, 1994, 120(5): 871
- [14] Hammecker C, Antonino A C D, Maeght J L, et al. Experimental and numerical study of water flow in soil under irrigation in Northern Senegal: Evidence of air entrapment. *Eur J Soil Sci*, 2003, 54(3): 491
- [15] Sun D M, Zhu Y M, Zhang M J. Study on numerical model for water-air two-phase flow in unsaturated soil. *Chin J Geotech Eng*, 2007, 29(4): 560
(孙冬梅, 朱岳明, 张明进. 非饱和带水-气二相流数值模拟研究. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 560)
- [16] Sun D M, Zhu Y M, Zhang M J, et al. Analysis of rainfall infiltration process considering influence of pore air pressure. *Rock Soil Mech*, 2008, 29(9): 2307
(孙冬梅, 朱岳明, 张明进, 等. 考虑气相影响的降雨入渗过程分析研究. 岩土力学, 2008, 29(9): 2307)
- [17] Sun D M, Feng P, Zhang M J. Refined analysis of stability of unsaturated soil slope due to rainfall infiltration considering the effect of gas phase. *J Tianjin Univ*, 2009, 42(9): 777
(孙冬梅, 冯平, 张明进. 考虑气相作用的降雨入渗对非饱和土坡稳定性的影响. 天津大学学报, 2009, 42(9): 777)
- [18] Li Y N, Lv H X, Lin X C. Regularities of air pressure changes in soil infiltration. *Acta Univ Agric Boreali-occidentalis*, 1995, 23(6): 72
(李援农, 吕宏兴, 林性粹. 土壤入渗过程中空气压力变化规律的研究. 西北农业大学学报, 1995, 23(6): 72)
- [19] Li Y N, Liu S B. Changes of two soil phases in the process of infiltration. *J Northwest Sci-tech Univ Agric Forest (Nat Sci Ed)*, 2002, 30(6): 177
(李援农, 刘书榜. 土壤入渗气液两相流的变化过程. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(6): 177)
- [20] Li Y N, Fei L J. Green-Ampt model for unsaturated infiltration affected by air pressure entrapped in soil. *J Hydraul Eng*, 2005, 36(6): 733
(李援农, 费良军. 土壤空气压力影响下的非饱和入渗格林-安姆特模型. 水利学报, 2005, 36(6): 733)
- [21] Wang Z, Feyen J, Nielsen D R, et al. Two-phase flow infiltration equations accounting for air entrapment effects. *Water Resour Res*, 1997, 33(12): 2759
- [22] Han T C, Ma S G, Xu R Q. Research on delayed effect of landslides caused by air pressure under heavy rainfall. *Rock Soil Mech*, 2013, 34(5): 1360
(韩同春, 马世国, 徐日庆. 强降雨条件下气压对滑坡延时效应研究. 岩土力学, 2013, 34(5): 1360)
- [23] Regmi R K, Lee G, Jung K. Analysis on failure of slope and landslide dam. *KSCE J Civil Eng*, 2013, 17(5): 1166
- [24] Wang J C, Yu J L, Gong X N, et al. Research on effect of closed air pressure on slope stability under intense rainfall. *Rock Soil Mech*, 2014, 35(11): 3157
(王继成, 俞建霖, 龚晓南, 等. 大降雨条件下气压力对边坡稳定的影响研究. 岩土力学, 2014, 35(11): 3157)
- [25] Zhang X Y, Zhu Y M, Fang C H. The role fore air flow in soil slope stability analysis. *J Hydrodyn Ser B*, 2009, 21(5): 640
- [26] He J. *The Moisture Response and Landslide Stability Analysis Under the Condition of Rainfall Infiltration* [Dissertation]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018
(何健. 降雨入渗条件下的水气响应及边坡稳定性分析[学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018)
- [27] Ai X T, Wang G J, Zhang C, et al. Research on the stability of high dump with wide graded waste rock. *Rock Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3777
(艾啸韬, 王光进, 张超, 等. 宽级配废石的高排土场稳定性研究. 岩土力学, 2020, 41(11): 3777)
- [28] Wang G J, Kong X Y, Yang C H. Research on the representation of granular vertical size grading and numerical simulation method with the typical waste rock site. *Teh Vjesn*, 2015, 22(3): 677
- [29] Cao Y H, Li Y. Test verification and modification of Mohr-Coulomb criterion. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2020, 51(2): 399
(曹艺辉, 李钊. Mohr-Coulomb准则的试验验证与修正. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(2): 399)
- [30] Wang G J, Yang C H, Zhang C, et al. Research on particle size grading and slope stability analysis of super-high dumping site. *Rock Soil Mech*, 2011, 32(3): 905
(王光进, 杨春和, 张超, 等. 超高排土场的粒径分级及其边坡稳定性分析研究. 岩土力学, 2011, 32(3): 905)
- [31] Han L, Shu J S, Shang T, et al. Experiment study on the physical and mechanical parameters of soft rock remolding in waste dump. *J Min Saf Eng*, 2019, 36(4): 820
(韩流, 舒继森, 尚涛, 等. 排土场散体软岩重塑物理力学参数研究. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(4): 820)
- [32] Wang G J, Tian S, Hu B, et al. Evolution pattern of tailings flow from dam failure and the buffering effect of debris blocking dams.

- Water*, 2019, 11(11): 2388
- [33] Li Y, Yang Y S, Mao Q S, et al. Researches on general stability for dump slope based on three-dimensional geologic model. *Rock Soil Mech*, 2013, 34(Suppl 1): 533
(李跃, 杨永生, 毛权生, 等. 基于三维地质模型的排土场边坡整体稳定性探究. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 533)
- [34] Ai X T, Wang G J, Kong X Y, et al. The scale effect of coarse-grained materials by triaxial test simulation. *Adva Civil Eng*, 2021, 2021: 6665531
- [35] Deng D P, Li L, Zhao L H. Limit equilibrium method(LEM) of slope stability and calculation of comprehensive factor of safety with double strength-reduction technique. *J Mountain Sci*, 2017, 14(11): 2311
- [36] Tao Z G, Li H X, Cai H, et al. Test on the slope stability of full-section high dump under rainfall. *J China Coal Soc*, 2020, 45(11): 3793
(陶志刚, 李华鑫, 曹辉, 等. 降雨条件下全段高排土场边坡稳定性模型实验研究. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3793)
- [37] Wang G J, Kang J W, Du C, et al. Study on tailings dam overtopping failure model test and break mechanism under the rainfall condition. *Teh Vjesn*, 2017, 24(6): 1897